

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Kone- ja tuotesuunnittelu

Anssi Suuronen

MOODIANALYYSILAITTEISTON KARTOITUS JA KÄYTTÖÖNOTTO TUULIVOIMAGENERAATTO- REITA VALMISTAVASSA YRITYKSESSÄ

Opinnäytetyö 2011

TIIVISTELMÄ

Anssi Suuronen

Moodianalyysilaitteiston kartoitus ja käyttöönotto tuulivoimageneraattoreita valmistavassa yrityksessä, 44 sivua, 9 liitettä

Tekniikan yksikkö, Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Kone- ja tuotesuunnittelu

Opinnäytetyö. 2010

Ohjaajat: tutkimuspäällikkö Jussi Sopanen, Saimaan ammattikorkeakoulu; kehitysinsinööri Marko Tuuha, The Switch; tuotekehitysinsinööri Antti Kärkkäinen
The Switch

Opinnäytetyön aihe on moodianalyysiin eli mekaanisten värähtelyominaisuuksien mittaamiseen tarvittavan laitteiston selvittäminen ja käyttöönotto. Työn tavoitteena oli selvittää ja hankkia tarvittavat mittalaitteet, joilla kohdeyritys, The Switch, pystyy jatkossa suorittamaan perinteisiä moodianalyysijä. Opinnäytetyön case-osuudessa suoritettiin esimerkkimittaus, jonka perusteella tuli laatia mittausohje kokeellisen moodianalyysin suorittamisesta.

Tutkimusmenetelminä opinnäytetyössä käytettiin tiedon tutkimista eri lähteistä, lähinnä ulkomaalaisesta kirjallisuudesta ja eri värähtelymittalaittevalmistajien kotisivuilta.

The Switch on vuonna 2006 perustettu teknologiayritys, joka toimittaa megawattiluokan kestopagneettigeneraattoreita tuulivoima käyttöön sekä tehonmuokkaimia uusiutuviin energiaratkaisuihin. Lisäksi The Switch valmistaa polttokennojen tehoelektroniikkajärjestelmiä sekä suurnopeuskoneita, mutta pääasiallinen liiketoimintavolyymi saadaan tuulivoimasovelluksista.

Työ aloitettiin selvittämällä moodianalyysiin ja mekaniikkaan värähtelyihin liittyvää teorian tietoa ja periaatteita. Lisäksi kartoitettiin The Switchillä olevia mittalaitteita sekä niiden soveltuvuutta kokeelliseen moodianalyysiin. Seuraavaksi selvitettiin hankittavat mittalaitteet. Niistä tehtiin tarjouspyynnöt sekä hankintapäätökset yrityksen toimesta. Mittausohjelmiston toimituksessa ilmenneen viivästyksen vuoksi case-osuuden mittaukset suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston moodianalyysilaitteistolla yhteistyössä tutkija Janne Heikkisen kanssa. Mittauksista saatujen kokemusten perusteella kirjoitettiin mittausohje.

Työn lopputuloksena saatiin The Switchille hankittua tarvittavat mittalaitteistot, joilla he pystyvät suorittamaan kokeellisia moodianalyysijä omalla tehtaallaan. Esimerkkimittauksissa saatuja tuloksia käytettiin hyväksi myös Eero Schermanin opinnäytetyössä ”Koneteknisen laskennan menetelmät ja ohjeistus standardinopeustuulivoimalageneraattorin analysointiin”. Kyseisessä opinnäytetyössä mittauksien tuloksia verrattiin Schermanin suorittamiin FEM-menetelmällä saatuihin laskentatuloksiin sekä verifioitiin simulointimallia mittauksien perusteella.

Avainsanat: Kokeellinen moodianalyysi, ominaistajuus, ominaisuus

ABSTRACT

Anssi Suuronen

Modal analysis equipment research and introduction of wind power generator manufacturing company, 44 pages, 9 appendices

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Technology, Degree Programme in Mechanical Engineering

Mechanical engineering and product design

Bachelor's Thesis, 2011

Instructors: Mr. Jussi Sopanen, Research Manager, Saimaa University of Applied Sciences; Mr. Marko Tuuha, Development Engineer, The Switch; Mr. Antti Kärkkäinen, Senior Engineer in R&D, The Switch

The subject of thesis was modal analysis equipment research and introduction of wind power generator manufacturing company. The aim was to investigate and acquire the necessary instrumentation to the target company The Switch. With the necessary instrumentation The Switch will be able to carry out the traditional modal analysis. An example of measurement and measurement guide for experimental modal analysis was made in the case study.

The methods used to study were the information from various sources, mostly in foreign literature and different vibration measurement solutions from the manufacturers' websites.

The Switch is a leading supplier of megawatt-class permanent magnet generator and full-power converter packages for wind power and other new energy applications. The Switch also manufactures fuel cell power electronics systems and high-speed machines.

The work was started by examining the modal analysis and mechanical vibrations of theoretical knowledge and principles. At the beginning The Switch measuring devices and their suitability for the experimental modal analysis were studied. The acquired measurement devices were examined next. Then The Switch made an invitation for the tenders and a purchase decision for the necessary instruments. Because of the delivery delays, case measurements were carried out using Lappeenranta University of Technology modal analysis measuring devices in co-operation with researcher Janne Heikkinen. Then the measurement guide for experimental modal analysis based on the case measurements was written.

The final result of the thesis was that The Switch could purchase the necessary measurement equipment and be able to perform the experimental modal analysis of its own site. The case measurements were also used in Eero Scherman's bachelor thesis "Methods of technical calculation and guidance for standard speed wind generator analysis". In this thesis the measurement results were compared with Scherman's results calculated with the FEM -method and the simulation model based on measurements was verified.

Keywords: Experimental modal analysis, EMA, natural frequency, natural mode

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO.....	5
1.1 Tuulienergian tuottaminen	6
1.2 The Switch	7
2 TEORIA	9
2.1 Värähtelymekaniikka.....	9
2.1.1 Yhden vapausasteen värähtelijä	9
2.1.2 Usean vapausasteen värähtelijä	11
2.1.3 Vaimennus	12
2.1.4 Taajuusvastefunktio	13
2.2 Moodianalyysi	17
2.2.1 Kokeellinen moodianalyysi	17
2.2.2 Herätevasara.....	19
2.2.3 Tärstimet	21
2.2.4 Vasteen mittaaminen.....	23
2.2.5 Kappaleen kiinnitys analyysissä	26
2.2.6 Laitteiston kalibrointi.....	27
2.2.7 Käynninaikainen moodianalyysi	28
3 YRITYKSEN TARVITSEMAT MITTALAITEHANKINNAT	29
3.1 Tarvittavat mittalaitteet.....	29
3.2 Herätevasaran ja -tärstimen vertailu	30
3.3 Brüel & Kjærin herätevasarat.....	31
3.4 Brüel & Kjær hand-held exciter 5961	32
3.5 Mittalaitteiden valinta	33
4 CASE: PMR 450B LAAKERIKILVEN JA RUNGON VÄLISEN LIITOK- SEN JÄYKKYYDEN SELVITTÄMINEN	34
4.1 Mittausten suorittaminen.....	36
4.2 Tulosten tulkinta.....	37
5 PÄÄTELMÄT	39
KUVAT	41
TAULUKOT	42

ERILLISET LIITTEET

- Liite 1 Mittaus- ja iskupaikkojen sijainnit laakerikilvessä
- Liite 2 Vapaamuotojen mittaus laakerikilvestä
- Liite 3 Runkoon kiinnitetty laakerikilpi
- Liite 4 Eri kiinnitysmenetelmien vaikutus mittaukseen
- Liite 5 Eri iskupisteen vaikutus mittaukseen
- Liite 6 Eri mittauspisteiden vaikutus mittaukseen
- Liite 7 Mitatut ominaistajuuden arvot
- Liite 8 Kilven vapaatuennan taajuusvastefunktio
- Liite 9 Mittausohje

1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni tarkoituksena on kartoittaa tarvittavat mittausvälineet, joilla voidaan suorittaa kokeellisia moodianalyyskejä The Switchin Lappeenrannan tehtaalla. Kokeellisessa moodianalyysissä selvitetään kokeellisin menetelmin rakenteen värähtelyominaisuudet. Yleisimmät tutkimuksen kohteet ovat rakenteen ominaisvärähtelytaajuudet, ominaisvärähtelymuodot sekä värähtelyjen vaimennussuhteet. Aikaisemmin The Switch oli teettänyt moodianalyyskejä ulkopuolisilla alihankkijoilla, mutta opinnäytetyöni pohjalta hankituilla mittalaitteilla voidaan analyyskejä suorittaa omalla tehtaalla ja saada näin nopeasti tarvittavia mittaus tuloksia tuotekehityksen ja suunnittelun tarpeisiin.

Mittalaitteiden selvityksessä ei käsitelty analysointiohjelmistoja eikä niiden vertailua. Tarvittavien ohjelmistojen selvityksen ja hankinnan suoritti The Switch. Lisäksi työssä ei käsitelty analysointiohjelmiston toimintaan liittyvää teorian tietoa eikä eri käyränsovitusmenetelmiä.

Työssä perehdytään mekaanisten värähtelyjen teoriaan sekä moodianalyysiin ja sen eri suoritustapoihin. Työssä selvitetään kokeelliseen moodianalyysin tarvittava laitteisto sekä suoritetaan hankitun laitteiston käyttöönotto. Tutkimusmenetelminä käytettiin tiedon tutkimista eri lähteistä, lähinnä ulkomaisesta kirjallisuudesta ja värähtelymittalaittevalmistajien antamista tiedoista.

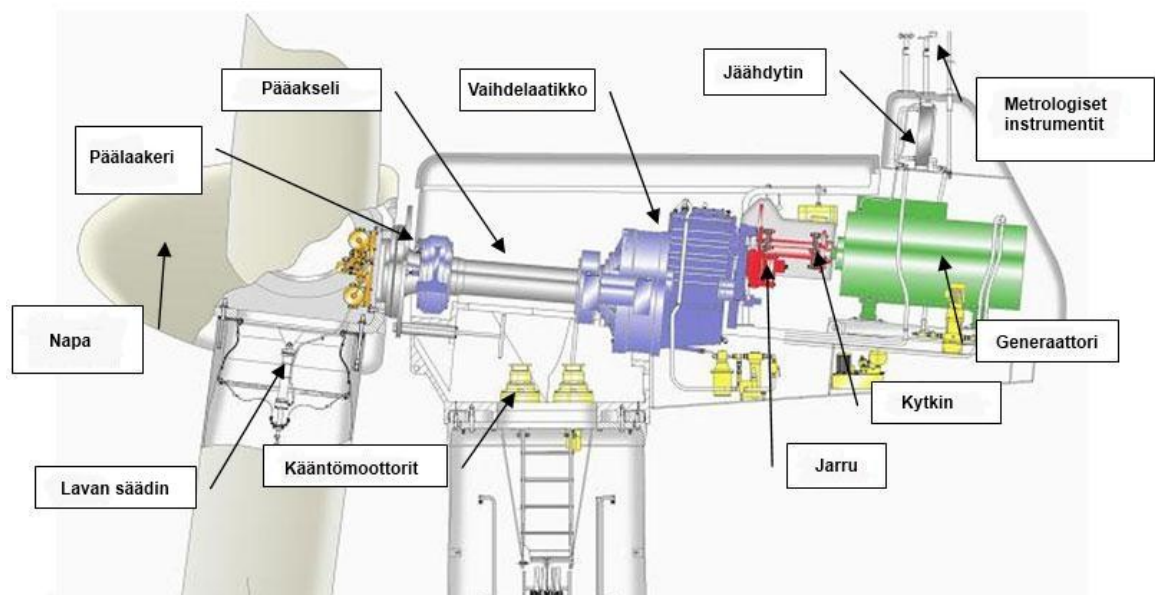
Työn case-osuudessa suoritetaan kokeellinen moodianalyysi yhdessä Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkija Janne Heikkisen kanssa tuulivoimageneraattorin laakerikilvellen ollessa kiinnitettynä generaattorin runkoon. Saatuja mitaustuloksia käytetään hyödyksi myös Eero Schermanin opinnäytetyössä, jossa laakerikilven ja rungon simulointimallia verifioitiin saatujen mitaustulosten pohjalta. Saatujen tulosten pohjalta voidaan arvioida laakerikilven ja rungon liitoksen jäykkyyden suuruutta, mikä ilman kokeellisia mittauksia olisi haastavaa.

Opinnäytetyöni on osa Permanent Magnet Wind Generator - Part2 (PMWG-2)-projektiä, joka on Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja Saimaan ammattikor-

keakoulun yhdessä toteuttama projekti, jossa tehdään tuulivoimageneraattoreiden tutkimusta The Switch Drive Systems Oy:lle.

1.1 Tuulienergian tuottaminen

Tuulivoimalan toiminnan fysikaalinen perusta on ilman liike-energian muuttaminen voimalan siipien pyörimisenergiaksi. Tuulivoima on uusiutuvaa energiaa, joka on peräisin auringon säteilyenergiasta. Ennen tuulivoimalla pyöritettiin myllyjä ja pumppuja, jolloin puhuttiin tuulimyllyistä, mutta nykyisin pyörimisenergia muutetaan generaattorin avulla sähköenergiaksi. Yleisin käytössä oleva tuuliturbiinityyppi on vaaka-akselinen turbiini, jossa kolmesiipinen roottori pyörittää vaihdelaatikon välityksellä generaattoria. Kuvassa 1.1 on esitetty tyypillisen tuuliturbiinin pääkomponentit.



Kuva 1.1 Vaaka-akselisen tuuliturbiinin pääkomponentit (Brüel and Kjær Sound & Vibration Measurements)

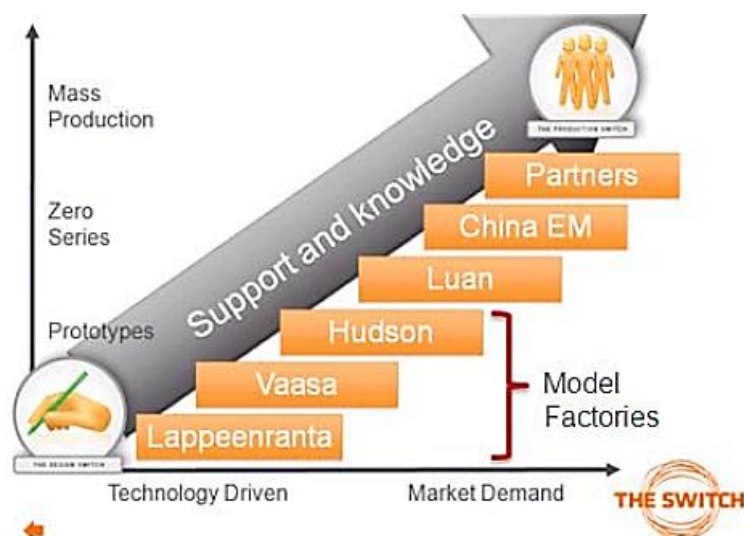
Tuulivoima poikkeaa perinteisestä sähköntuotannosta ajallisen vaihtelun vuoksi. Tuulisähkön tuotanto vaihtelee päivittäin tuulisuuden mukaan, joten sähköverkon vakautta on hoidettava säätämällä muiden energiaa tuottavien laitosten

kuten vesivoimaloiden toimintaa. Nykyisin eniten käytetyt voimalat ovat nimellisteholtaan 2–3 MW. (Suomen tuulivoimayhdistys ry 2011.)

1.2 The Switch

Teknologiayhtiö The Switch syntyi vuonna 2006, kun lappeenrantalainen erikoissähkömoottoreita valmistanut Rotatek Finland, vaasalainen tehoelektroniikkaan keskittynyt Verteco Oy ja amerikkalainen sähkökäyttöä suunnitellut Youtility Inc yhdistyivät. The Switchin pääasialliset tuotteet ovat megawattiluokan kestmagneettigeneraattorit ja uusiutuviin energialähteisiin liittyvät tehonmuokaimet. Lisäksi The Switch valmistaa polttokennojen tehoelektroniikkajärjestelmiä sekä suurnopeuskoneita, mutta pääasiallinen liiketoimintavolyymi saadaan tuulivoimasovelluksista.

The Switchillä on tehtaita Lappeenrannassa, Vaasassa, Yhdysvaltain Hudsonissa sekä Kiinassa. Pääkonttori sijaitsee Vantaalla. Lappeenrannassa sijaitseva tehdas on yksi The Switchin mallitehtaista. Lappeenrannan tehtaalla suunnitellaan, kokoonpannaan sekä testataan nopeita ja puolinopeita kestmagneettigeneraattoreita Kiinassa tapahtuvaa massatuotantoa varten. Yrityksen tuotantolinjamalli on esitetty kuvassa 1.2. The Switchin pääasialliset asiakkaat ovat Euroopassa, Intiassa, Kiinassa ja Yhdysvalloissa.



Kuva 1.2 The Switchin tuotantolinjamalli (The Switch 2011)

The Switch valmistaa kestopagneettigeneraattoreita kolmessa eri nopeusluokassa. Nopeakäyntisten generaattoreiden pyörimisnopeus on 1000–1500 rpm ja nimellisteho 1,1–5,6 MW. Keskinopeiden generaattoreiden pyörimisnopeus on 130–300 rpm ja suoravetoisten generaattoreiden 16–18 rpm. Suoravetoisessa generaattorissa ei tarvita vaihteistoa vaan generaattori on kytketty suoraan turbiinin akselille. Kuvassa 1.3 on The Switchin nopeakäyntinen kestopagneettigeneraattori.



Kuva 1.3 The Switchin nopeakäyntinen kestopagneettigeneraattori (The Switch 2011)

Maaliskuussa 2011 The Switchin koko osakekanta myytiin yhdysvaltalaiselle American Superconductor Corporationille 190 miljoonan euron kauppahintaan. Yritysjärjestelyn jälkeen The Switchistä tulee American Superconductorin täysin omistama tytäryhtiö. (The Switch 2011.)

2 TEORIA

2.1 Värähtelymekaniikka

Värähtely on fysikaalisen systeemin liikettä tasapainoaseman ympärillä. Värähtelyt koneissa ja rakenteissa ovat usein haitallisia. Haitallisia ilmiöitä ovat muun muassa jännitysten lisääntyminen rakenteissa, kestoiän lyhentyminen sekä ympäristölle haitallinen melu. Värähtelyä voidaan käyttää myös hyväksi muun muassa seuloissa ja kuljettimissa. (Pennala 1999, s.11.)

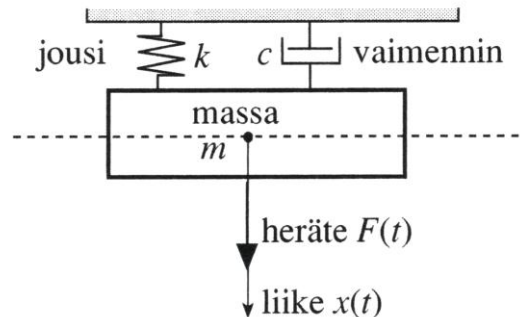
Koneensuunnittelulla värähtelyjä ei pystytä kokonaan estämään, eikä siihen ole tarvettakaan, kunhan tiedetään värähtelyn ominaisuudet ja otetaan ne huomioon suunnittelussa. Tuntemalla värähtelyn teoriaa, värähtelyjä pystytään analysoimaan, mittaamaan ja hallitsemaan siten, etteivät ne vahingoita rakenteita tai mekaanisia osia. (Inman 2008, s.1–2.)

Värähtely voi olla vapaata tai pakotettua. Vapaassa värähtelyssä systeemiin ei vaikuta ulkoisia voimia ja värähtely tapahtuu systeemin ominaistuuksilla. Pakkovärähtelyssä ulkoinen voima eli heräte määrää värähtelyn taajuuden. Jos systeemiin vaikuttavan herätteen taajuus on lähellä rakenteen ominaistuuksia, voi syntyä resonanssi. Resonanssissa värähtelyn amplitudi eli aallonkorkeuden maksimiarvo kasvaa suureksi, mikä voi vaurioittaa rakennetta. Käytännössä rakenteissa on aina vaimennusta, joka rajoittaa värähtelyn amplitudia. Värähtelyn ominaismuoto kuvaa massojen keskinäisiä suhteellisia liikkeitä, ei niiden absoluuttisia asemia. (Sopanen 2010.)

2.1.1 Yhden vapausasteen värähtelijä

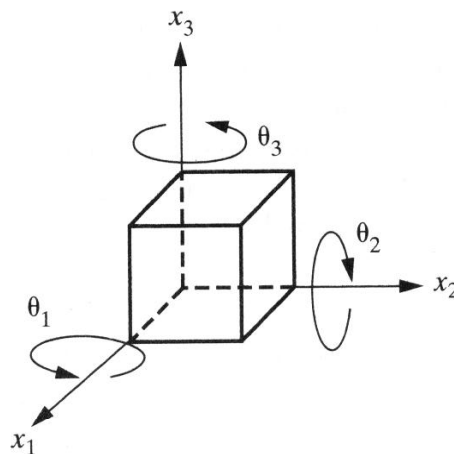
Kaikilla rakenteilla on massa ja jäykkyys, joiden suuruus ja jakautuminen vaikuttavat rakenteen dynaamiseen käyttäytymiseen. Värähtelevässä mekaanisessa systeemissä on vähintään yksi pistemäiseksi keskitetty massa sekä jousi, jolloin systeemillä on yksi vapausaste eli riippumattomien koordinaattien määrä (de-

gree of freedom, dof), kuvan 2.1 mukaisesti. Lisäksi systeemissä voi olla myös vaimennin.



Kuva 2.1 Yhden vapausasteen värähtelijä (Pennala 1999, s.13)

Yleisessä tapauksessa pistemäisellä massalla on kuusi vapausastetta, kolme siirtymää (translaatio) ja kolme kiertymää (rotaatio) kuvan 2.2 mukaisesti. Kun pistemäisiä massoja on useampia, vapausasteiden määrä kasvaa. (Pennala 1999, s.13.)



Kuva 2.2 Jäykän kappaleen kuusi eri vapausastetta (Inman 2008)

Harmonisen värähtelyn liikeyhtälö yhden vapausasteen vaimennetulle systeemille, johon ei vaikuta ulkoisia voimia on yhtälön 2.1 mukaisesti

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

missä m on värähtelijän massa, c on vaimennuskerroin, k on värähtelijän jousivakio, \dot{x} on aseman ensimmäinen aikaderivaatta eli nopeus ja \ddot{x} on aseman toinen aikaderivaatta eli kiihtyvyys. (Inman 2008, s.7.)

Vapaan yhden vapausasteen vaimentamattoman värähtelyn ominaiskulmataajuus (kulmanopeus, kulmataajuus) voidaan ratkaista yhtälön 2.2 mukaisesti.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2)$$

missä ω on ominaiskulmataajuus, k on värähtelijän jousivakio ja m värähtelijän massa. (Sopanen 2010.)

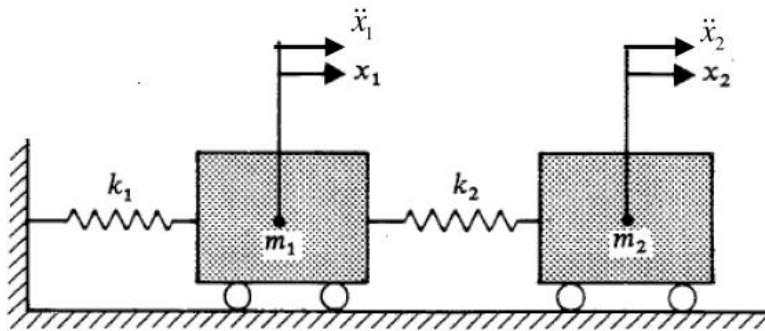
Ominaistaajuudelle ja ominaiskulmataajuudelle voidaan johtaa yhteys kaavan 2.3 mukaisesti

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.3)$$

missä f on ominaistaajuus ja ω ominaiskulmataajuus. Termit voivat sekoittua helposti kirjallisuudessa, mutta parhaiten ne erottavat yksiköidensä perusteella. Taajuuden yksikkö on Hz ja kulmataajuuden yksikkö rad/s. (Pennala 1999, s.22.)

2.1.2 Usean vapausasteen värähtelijä

Usean vapausasteen systeemillä tarkoitetaan mekaanista systeemiä, jonka liiketilan kuvaamiseen tarvitaan kaksi tai useampia koordinaatteja. Monia todellisia mekaanisia ja rakenteellisia systeemejä ei voida idealisoida yhden vapausasteen systeemeiksi, vaan niillä on lukematon määrä vapausasteita. Näiden monivapausasteisten (multiple degree of freedom, mdof) systeemien analysointi edellyttää approksimointia eli likiarvoistamista. Kuvassa 2.3 on esitetty kahden vapausasteen systeemi.



Kuva 2.3 Kahden vapausasteen systeemi (Sopanen 2010)

N -vapausasteisen lineaarisen mekaanisen systeemin liikeyhtälöt voidaan esittää matriisimuodossa yhtälön 2.4 mukaisesti.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2.4)$$

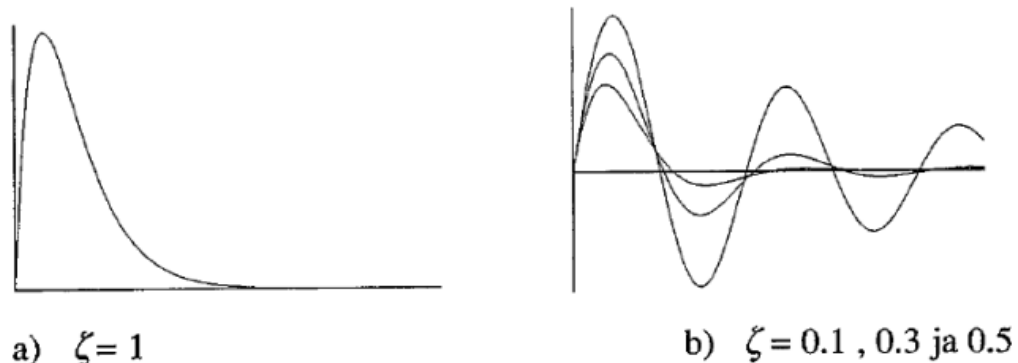
jossa $[M]$ $n \times n$ - massamatriisi, joka sisältää systeemin inertiaominaisuudet. $[C]$ on $n \times n$ - vaimennusmatriisi, joka sisältää systeemin vaimennusominaisuudet. $[K]$ on $n \times n$ - jäykkyyshmatriisi, joka sisältää systeemin jäykkyyso ominaisuudet. $\{\ddot{x}\}$ on kiihtyvyyshvektori, $\{\dot{x}\}$ on nopeushvektori, $\{x\}$ on asemavektori sekä $\{F\}$ on pakkovoimavektori. (Lähtenmäki 2007.)

2.1.3 Vaimennus

Vaimennetussa värähtelyssä systeemiin vaikuttaa liikettä vastustavia voimia, joiden tekemä työ muuttuu esimerkiksi lämmöksi ja poistuu systeemistä. Mikäli systeemiin ei tuoda ulkopuolelta lisäenergiaa, värähtelyt vaimenevat. Vaimennusnopeus riippuu systeemin vaimennuskertoimesta. Vaimennus voidaan tavallisesti jakaa kolmeen tyyppiin: viskoosivaimennukseen eli nestekitkaan, Coulombin vaimennukseen eli kuivaan kitkaan ja hystereesivaimennukseen eli rakenteen sisäiseen vaimennukseen. (Pennala 1999, s.62.)

Vaimennetussa systeemissä liikeyhtälöiden ratkaisun luonne riippuu vaimennussuhteen suuruudesta. Kun vaimennussuhde on suurempi kuin 1, on kyseessä ylikriittisesti vaimennettu systeemi. Ylikriittisesti vaimennetussa systeemissä värähtely on vaimennettu voimakkaasti, jolloin värähtely lähestyy tasapai-

noasemaansa hitaasti. Systeemi on kriittisesti vaimennettu, kun vaimennussuhde on tasan 1. Tällöin värähtely vaimenee välittömästi. Kun vaimennussuhde on alle 1:n, on kyseessä alikriittisesti vaimennettu systeemi. Käytännössä rakenteet ovat alikriittisesti vaimennettuja systeemejä ja niille on ominaista värähdellä tasapainoasemansa ympärillä. Eri vaimennustapaukset on esitetty kuvassa 2.4. (Heikkinen 2010, s.10-11.)



Kuva 2.4 Eri vaimennussuhdetapaukset (Sopanen 2010)

Alikriittisen vaimennetun ($0 < \xi < 1$) yhden vapausasteen systeemiin ominaiskulmataajuus on kaavan 2.5 mukaisesti

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.5)$$

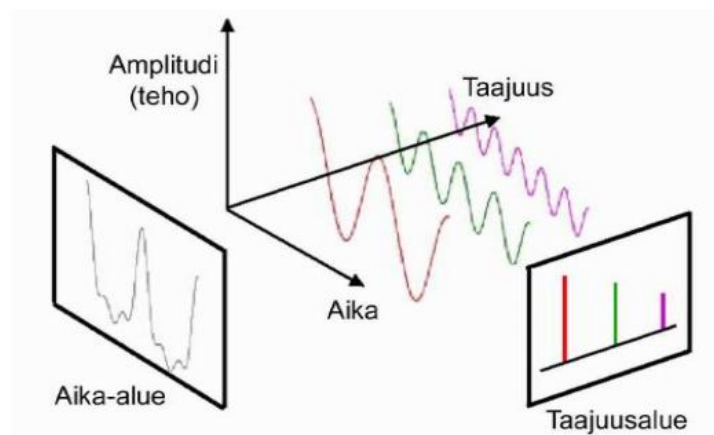
missä ω_d on vaimennettu ominaiskulmataajuus, ω on ominaiskulmataajuus ja ξ on vaimennussuhde. (Sopanen 2010.)

2.1.4 Taajuusvastefunktio

Taajuusvastefunktio (Frequency Responce Function) eli TVF (FRF) kuvaa yhteyden rakenteen vasteen ja herätevoiman välillä. Taajuusvastefunktio sisältää tiedon värähtelyn amplitudista sekä vaiheesta ja on kompleksimuotoinen funktio. Taajuusvastefunktioista saadaan selville rakenteen ominaistaajuuudet, ominaismuodot ja vaimennussuhteet. Heräte on aina taajuusvastefunktiossa voima (N), mutta mitattavan vasteen yksikkö määrää taajuusvastefunktion nimityksen.

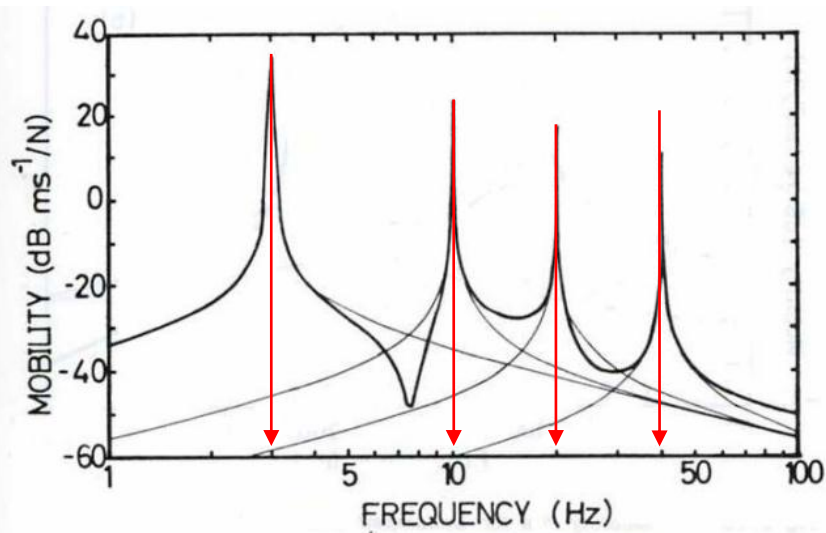
Kun vasteena on siirtymä, yhtälöä kutsutaan nimellä compliance eli joustaminen. Nopeuden ollessa vasteena yhtälöä kutsutaan nimellä mobility eli liikkuvuus. Jos vasteena on kiihtyvyys, puhutaan inertancesta tai receptancesta eli hitaudesta. Pelkät ominaistajuuksien arvot saadaan yhdellä mittauksella taajuusvastefunktiosta, mutta ominaismuotojen selvittämiseksi tarvitaan mittauksia useammasta kohtaa mitattavaa kappaletta. (Sopanen 2010.)

Analysointiohjelmisto luo mittaustuloksista eri signaalinkäsittelyalgoritmeja ja käyränsovitusmenetelmiä käyttäen kuvaajan. Yleisin käytetty menetelmä on Fast Fourier Transform –muunnos (FFT). FFT-muunnoksessa aikatazon signaali puretaan sinimuotoisiin komponentteihin. Taajuusvastefunktion taajuustaso muodostuu näistä komponenteista, kun ne laitetaan vierekkäin ja niitä katsotaan päistä. FTT-muunnoksen periaate on esitetty kuvassa 2.5. (Valkonen 2008.)



Kuva 2.5 FFT-muunnoksen periaate (Valkonen 2008)

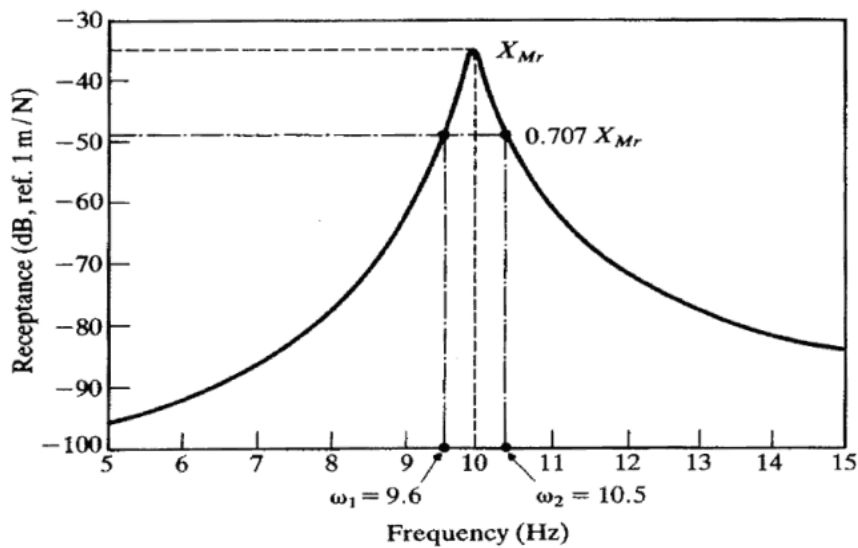
Taajuusvastefunktion kuvaajassa on kuvattu värähtelytaajuuksien intensiteetti ominaisvärähtelytaajuuksien funktiona. Kuvaajassa ominaistajauudet erottuvat korkeina piikkeinä. Kuvassa 2.6 on erään monivapausasteisen mittauksen taajuusvastefunktio. (Ewins 1991, s.62-63.)



Kuva 2.6 Erään mittauksen taajuusvastefunktio (Ewins 1991)

Kuvaajassa logaritmisella vaaka-akselilla ovat ominaisvärähtelytaajuudet ja pystyakselilla liikkuvuus eli nopeuden suhde herätteeseen. Kuvaajassa voidaan selvästi havaita neljä ominaistaajuutta, joiden taajuudet ovat 3 Hz, 10 Hz, 20 Hz ja 40 Hz.

Systeemin vaimennussuhde saadaan puoliteho pisteiden avulla kaavan 2.6 ja kuvan 2.7 mukaisesti.



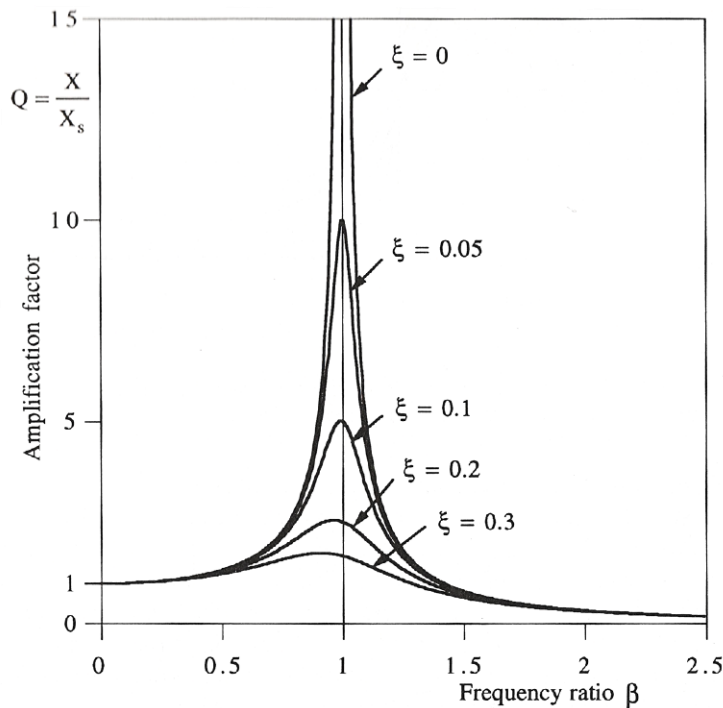
Kuva 2.7 Esimerkki puolitehopisteiden määrittämisestä (Sopanen 2010)

Yhtälö (2.6) vaimennussuhteen määrittämiseksi puolitehopisteiden avulla on

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (2.6)$$

missä ω_2 ja ω_1 ovat puolitehopisteitä ja ω_n taajuusvastefunktion huippukohta. (Sopanen 2010.)

Vaimennus vaikuttaa taajuusvastefunktioon madaltamalla funktion huippuarvoja sitä suuremmin, mitä isompi on vaimennus. Kuvassa 2.8 on erään mittauksen taajuusvastefunktio, jossa on kuvattu eri vaimennussuhteiden vaikutus funktioon.



Kuva 2.8 Vaimennussuhteen vaikutus taajuusvastefunktioon. (Maia & Silva 1997)

Kuvasta 2.8 voidaan päätellä, että eri vaimennussuhteet eivät vaikuta ominaistaajuuden arvoon eivätkä sen muotoon, mutta ominaistaajuuden havainnointi funktiosta suurella vaimennussuhteella vaikeutuu, koska ominaistaajuuspiikki ei enää erotu hyvin funktiosta. Lisäksi suurilla vaimennussuhteilla rakenteen re-

sonointi on vähäisempää, joten lähellä toisiaan olevien ominaistajuuksien ja niiden muotojen erottamiseen toisistaan vaikeutuu. (Maia & Silva 1997, s.10-11; Sopanen 2010.)

2.2 Moodianalyysi

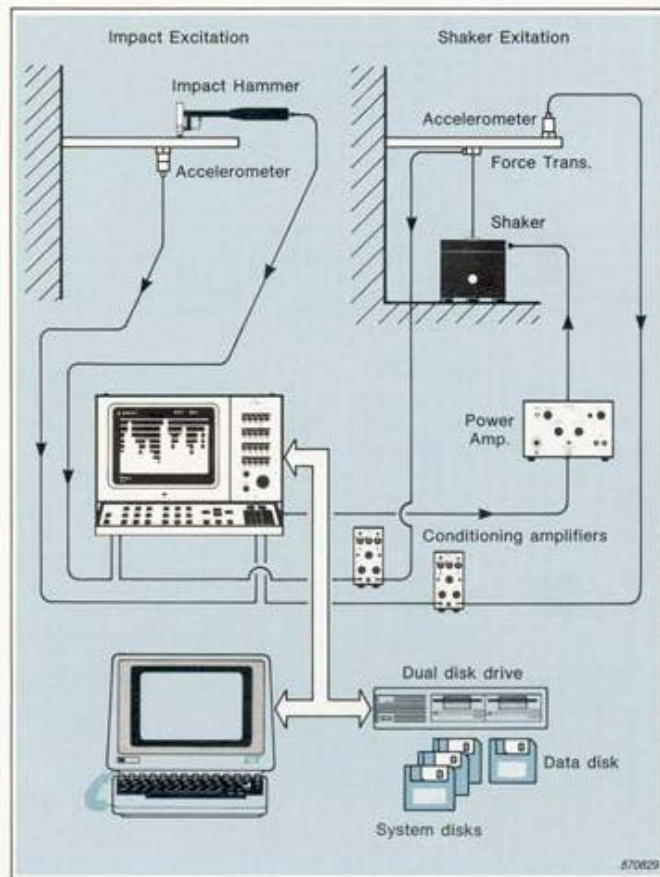
Jokaisella rakenteella on ominainen tapa ja muoto värähdellä. Tällöin rakenteessa hitausvoimat sekä elastiset voimat ovat sopivasti tasapainossa. Moodianalyysin tarkoituksena on selvittää rakenteen dynaamiset ominaisuudet eli ominaistajuuudet, värähtelymuodot ja muotojen vaimennussuhteet. Rakenteilla on loputtomasti eri värähtelymuotoja ja niiden taajuuksia, mutta käytännössä moodianalyysissä ollaan kiinnostuneita vain alimmista taajuuksista, jotka heräävät ensimmäisenä sekä taajuuksista, jotka ovat vastaavat rakenteessa ilmeneviä herätetaajuuksia, esimerkiksi pyörimisnopeutta ja sen kerrannaisia.

Ominaistajuuksien selvittämisen lisäksi moodianalyysin avulla voidaan laskentamalleja verifioida eli todentaa niiden paikkansapitävyys. Moodianalyysin avulla voidaan myös selvittää eri rakenteiden tuntemattomia parametreja, kuten kimmoeroiroin ja jäykkyys. Esimerkiksi kahden eri kappaleen välisen kutistusliitoksen jäykkyyttä on vaikea arvioida ilman liitoksen tutkimista kokeellisesti. Moodianalyysillä voidaan liitoksen jäykkyys saada selville vertaamalla liitoksesta saatuja mittaustuloksia ilman liitosta olevan kappaleen jäykkyyteen. Kyseisiä tuntemattomia parametreja voidaan hyödyntää esimerkiksi FEM-laskentaan syöttämällä, jolloin laskennan tarkkuus paranee. Rakenteen värähtelyominaisuuksien tarkka tunteminen vaatii sekä laskentaa (analyttinen moodianalyysi) että kokeellisia mittauksia (kokeellinen moodianalyysi). (Sopanen 2010.)

2.2.1 Kokeellinen moodianalyysi

Kokeellisessa moodianalyysissä rakenteeseen aiheutetaan tunnettu voimahäerte ominaistajuuksien ja -muotojen herättämiseksi. Häerte aiheutetaan rakenteeseen yleensä vasaran iskulla tai tärstimellä, mikä tuottaa tietyn suuruisen amplitudin ja taajuuden. Rakenteesta mitataan samanaikaisesti herätteen kanssa vaste. Vasteen mittaukseen käytetään yleensä kiihtyvyyssanturia tai laser-

mittausta. Kokeellisissa moodianalyysissä käytettävä laitteisto on esitetty kuvassa 2.9.



Kuva 2.9 Kokeellisen moodianalyysin mittauslaitteisto (Døssing 1988)

Mittauksen yhdenaikaisuuden vuoksi analyysointilaitteissa tulee olla vähintään kaksi mittauskanavaa. Lisäksi analyysointilaitteissa tulee olla A/D-muunnin, jolla mittauksista saatava analoginen signaali muunnetaan digitaalseksi jälkikäsittelyä varten. Digitaalinen informaatio käsitellään yleensä tietokoneella olevalla mittaus- ja analysointiohjelmalla, jossa tapahtuu signaalin jälkikäsittely ja käyrien sovitus mittaustuloksiin. (Brüel & Kjær 2011.)

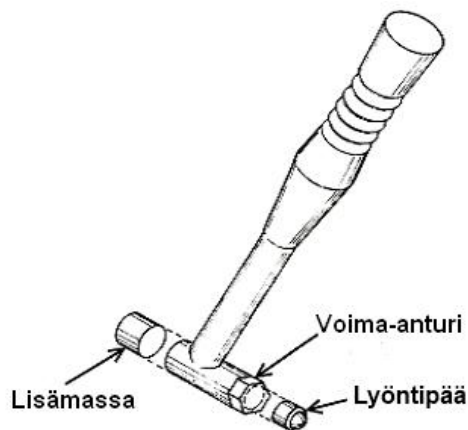
Mittaukset tulee suorittaa monen mittauksen keskiarvoina, jotta mittauksissa esiintyvät kohinat ja satunnaiset mittausvirheiden vaikutukset vähenevät. Mittaukset tulee suorittaa useasta pisteestä rakennetta, joko tuomalla heräte samaan paikkaan rakenteeseen ja siirtämällä antureita tai toisinpäin. Yleisesti mittauk-

sissa on käytetty yhtä herätettä (SIMO, single-input, multiple-output), mutta nykyisin käytetään mittauksissa usean herätteen menetelmää (MIMO, multi-input, multiple-output). Usean herätteen mittausmenetelmä mahdollistaa herättämään yhdellä mittauksella kaikki muodot, joista ollaan kiinnostuneita. Perinteisellä yhden herätteen menetelmällä tämä ei ole välttämättä mahdollista. Lisäksi rakenteella voi olla muotoja, jotka ovat hyvin lähellä toisiaan. Näiden muotojen tunnistamiseksi tarvitaan useampi heräte. (Schwarz & Richardson 1999, s.4-5.)

Rakenteen ominaistajuudet voidaan selvittää yhden herätteen ja yhden anturin kanssa, mutta ominaismuotojen selvittämiseksi tarvitaan mittauksia useammasta kohtaa rakennetta. Mittauksessa voidaan herätteen ja antureiden paikkaa muuttaa tai käyttää useampia antureita mittauksessa. Nykyisin yleisesti käytetty menetelmä ominaismuotojen selvittämiseksi on suorittaa tietokoneella mallinnetulle rakenteelle FEM-analyysi, josta saavat ominaistajuudet todennetaan kokeellisesti. Jos lasketut ja mitatut taajuudet pitävät paikkaansa, voidaan olettaa, että FEM-analyysissä taajuuksia vastaavat muodotkin pitävät todellisuudessa paikkaansa. (Sopanen 2010.)

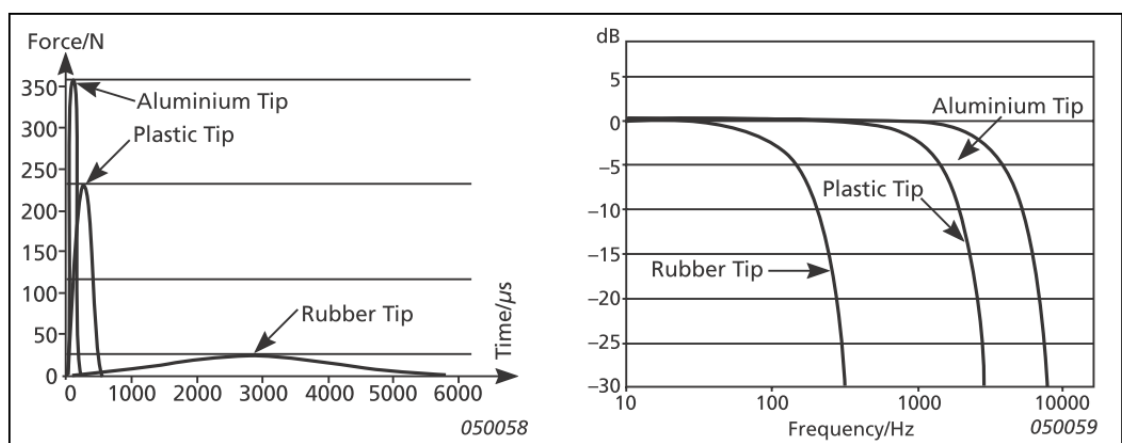
2.2.2 Herätevasara

Kokeellisessa moodianalyysissä käytetty herätevasara (modal hammer) on laite, jolla mitattavaan rakenteeseen kohdistetaan herättävä voimapulssi. Vasara koostuu iskupäästä, voima-anturista, tasapainomassasta ja rungosta. Herätevasaran pääkomponentit ovat kuvassa 2.10. Mitattavaan rakenteeseen syntyvän herätteen suuruus määräytyy vasaran massasta ja nopeudesta iskuhetkellä. (Ewins 1991, s.102.)



Kuva 2.10 Herätevasaran pääkomponentit (Ewins 1991)

Vasaran lyöntikärjet ovat yleensä vaihdettavia ja niitä on saatavilla eri materiaaleina. Lyöntikärjen jäykkyys, yhdessä rakenteen pinnan jäykkyyden kanssa, määrittävät herätteen taajuusspektrin ja herätevoiman suuruuden. Yleisempiä lyöntipään materiaaleja ovat kumi, muovi ja teräs. Kovat kärjet, kuten teräs ja muovi aiheuttavat lyhyen impulssin laajalla taajuusalueella. Pehmeillä kärjillä, kuten kumilla, impulssivoima on pieni ja taajuusalue kapeampi, mutta impulssin kesto aika pitkä. Kuvassa 2.11 on esitetty Brüel & Kjær herätevasaran 8206 eri lyöntipäiden vaikutus herätevoimaan ja taajuusspektriin.



Kuva 2.11 Brüel & Kjær 8206 herätevasaran eri lyöntipäiden vaikutus (Brüel & Kjær 2011)

Monissa herätevasaroissa on mahdollisuus kiinnittää vasaraan lisämassa, jolla herätevoiman suuruutta voidaan lisätä, mutta samalla taajuusalue alenee. Herätevoiman mittaava voima-anturi on yleensä kiinnitetty vasaran rungon ja lyöntipään väliin tai on vasaran sisällä. (He & Fu 2001, s.141-142.)

2.2.3 Täristimet

Toinen kokeellisissa moodianalyyseissä käytetty herätelähde on täristin (exciter). Yleensä täristimiä on käytössä kolmea eri tyyppiä. Kaikilla on sekä hyvät että huonot puolensa ja täristimen valinta tulee suorittaa käyttökohteen mukaan. Täristimen valintaan vaikuttavat ensisijaisesti halutun taajuusalueen laajuus ja herätevoiman suuruus. Täristimet ovat herätevasaroihin verrattuna monimutkaisempia ja kalliimpia laitteita, mutta niillä voidaan suorittaa monimutkaisempia ja tarkempia analyysejä kuin herätevasaroilla. Lisäksi täristin vaatii toimiakseen signaaligeneraattorin ja signaalinvahvistimen. Signaaligeneraattori muuntaa analysointiohjelmistolla määritellystä herätteestä analogisen signaalin, joka vahvistimessa vahvistetaan halutun suuruiseksi täristintä varten. Signaaligeneraattori ja -vahvistin voivat olla erillisiä laitteita tai analysaattoriin sisäänrakennettuja. (Ewins 1991, s.94-99.)

Mekaaniset täristimet perustuvat pyörivään epätasapainoon, mikä aiheuttaa värähtelyä. Värähtelyn voimakkuutta voidaan säätää epätasapainomassan suuruudella. Mekaaniset täristimet ovat nykyisin harvinaisia ja niitä käytetään vain erikoiskohteissa. (Ewins 1991, s.95.)

Toinen ja eniten käytetty täristintyyppi on elektromagneettinen täristin. Elektromagneettisessa täristimessä sisään syötetty signaali muutetaan sähkökentäksi. Sähkökentässä oleva kela liikkuu sähkökentän mukaan ja aiheuttaa halutunlaista tärinää. Elektromagneettinen täristin soveltuu monen kokoisille kappaleille ja toimii laajalla taajuusalueella. Maksimiantotaajuus täristimelle on koon mukaan 30–50 kHz. Elektromagneettiset täristimet ovat pienikokoisia ja yksinkertaisia laitteita sekä suhteellisen edullisia. Kuvassa 2.12 on Brüel & Kjær:n elektromagneettinen täristin. (Ewins 1991, s.95-98.)



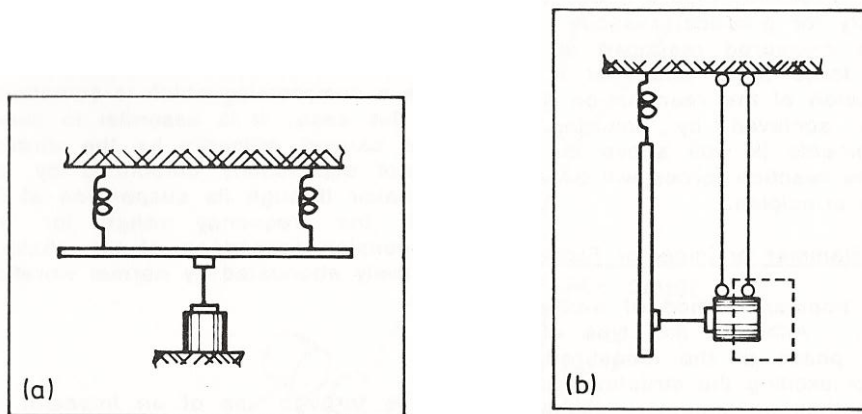
Kuva 2.12 Brüel & Kjær elektromagneettinen tärustin (Brüel & Kjær 2011)

Kolmas täristintyyppi on elektrohydraulinen tärustin. Kyseisen täristimen toiminta perustuu elektroniikan avulla ohjattuun hydrauliikkaan. Elektrohydrauliset täristimet pystyvät värähtelyn ohella antamaan myös staattista voimaa sekä ne soveltuvat hyvin myös väsyttäviin analyysihin. Elektrohydraulisen täristimen iskunpituus on suuri verrattuna elektromagneettisiin täristimiin ja niitä käytetäänkin kohteissa, jossa tarvitaan suurta herätevoimaa. Elektrohydraulisen täristimen käytettävissä oleva taajuusalue ulottuu noin 1 kHz:iin. (Ewins 1991, s.98.)

Täristimet kiinnitetään mitattavaan kappaleeseen joko teräslangalla tai terästangoilla. Voima-anturi kiinnitetään usein mitattavan kappaleen pinnan ja yhdystangon tai -langan väliin. Yhdystanko tai -lanka ei saa olla liian pitkä tai joustava, jotta sen omat resonanssitaajuuDET eivät häiritse mittausta. Erityisesti yhdystangon tai -langan aksiaalinen ominaismuoto on haitaksi mittaukselle ja niitä on pyrittävä välttämään. (Ewins 1991, s.98-99.)

Itse täristimen kiinnittäminen tulee suunnitella hyvin. Paras tapa analyysiä varten on kiinnittää täristinlaite mahdollisimman tukevasti maahan ja mitattava kappale joustavasti roikkumaan. Tällainen mittausjärjestely on kuvattu kuvassa 2.13 a). Toinen hyväksyttävä kiinnitystapa on ripustaa tärustin ilmaan. Tällöin

saatetaan joutua kiinnittämään täristimeen lisämassaa, jotta täristin pystyy synnyttämään riittävän määrän herätevoimaa alhaisilla taajuuksilla. Tämä tulee kyseeseen erityisesti silloin, kun herätteestä aiheutuva vastavoima liikuttaa täristintä. Kyseisessä kiinnitysmenettelässä mitattava kappale voi olla ripustettu tai maahan kiinnitetty. Kuvassa 2.13 b) on kuvattu jälkimmäistä mittaussjärjestelyä. (Ewins 1991, s.98-102.)



Kuva 2.13 a) Täristimen ihanteellinen kiinnitys (Ewins 1991) ja Kuva 2.13 b) Toinen menetelmä täristimen kiinnitykseen (Ewins 1991)

2.2.4 Vasteen mittaaminen

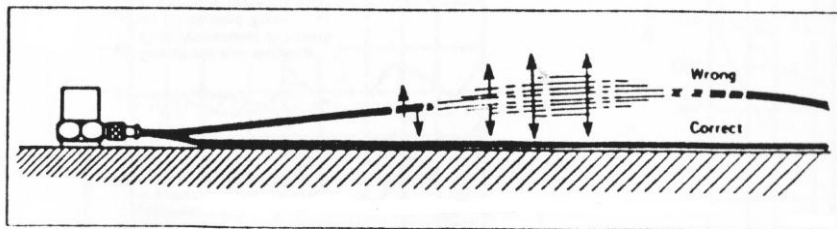
Kokeellisessa moodianalyysissä värähtelyjen vasteen mittaamiseen käytetään yleisemmin värähtelymittausanturia tai lasermittausta. Yleisin käytetty anturityyppi on piezosähköinen kiihtyvyysanturi. Kuvassa 2.14 on yleisesti käytetty Brüel & Kjaerin kiihtyvyysanturi. Piezosähköisillä antureilla on laaja sekä taajuuden että amplitudin mittausalue, niillä on hyvä herkkyys ja ne ovat pienikokoisia sekä keveitä.



Kuva 2.14 Brüel & Kjaer 8344 DeltaShear kiihtyvyysanturi (Brüel & Kjaer 2011)

Moodianalyysissä ja yleensäkin värinämittauksissa anturin kiinnitykseen tulee kiinnittää huomiota. Anturi tulee kiinnittää kappaleeseen kohtisuoraan kappaleen pintaa vasten, jotta värähtelyn aiheuttama liike siirtyy anturiin mahdollisimman hyvin. Anturin kiinnitysmenetelmä vaikuttaa suoraan mitattavissa olevan taajuusspektrin laajuuteen. Mitä tukevampi kiinnitysmenetelmä on, sitä korkeampia taajuuksia voidaan mitata. Yleisempiä kiinnitysmenetelmiä ovat ruuvi-kiinnitys, magneetti ja vaha. Yleinen ohjesääntö on, että käytettävissä oleva mitta-alue on kolmannes maksimaalisesta mitta-alueesta. (Agilent Technologies. 2000, s.25-26.)

Anturi tulee kiinnittää rakenteessa paikkaan, jossa muodonmuutokset ovat suurimmat sekä välttää paikkoja rakenteessa, jossa siirtymiä ei ole. Esimerkiksi ominaismuotojen solmukohtia tulee välttää, koska niissä ei esiinny liikettä värähtelyssä. Yleensä anturit mittaavat liikettä vain yhteen suuntaan, joten anturit tulevat sijoitettua siten, että kaikki liikkeen suunnat tulevat mitatuksi tai käyttää useamman liikesuunnan mittaavia antureita. Lisäksi antureita kiinnitettäessä on muistettava kiinnittää antureiden ja muiden mittalaitteiden johdot siten, että ne eivät pääse antamaan häiriöitä mittaukseen. Kuvassa 2.15 on esitetty oikea johdon asento mittauksessa. (Kainulainen 1997.)

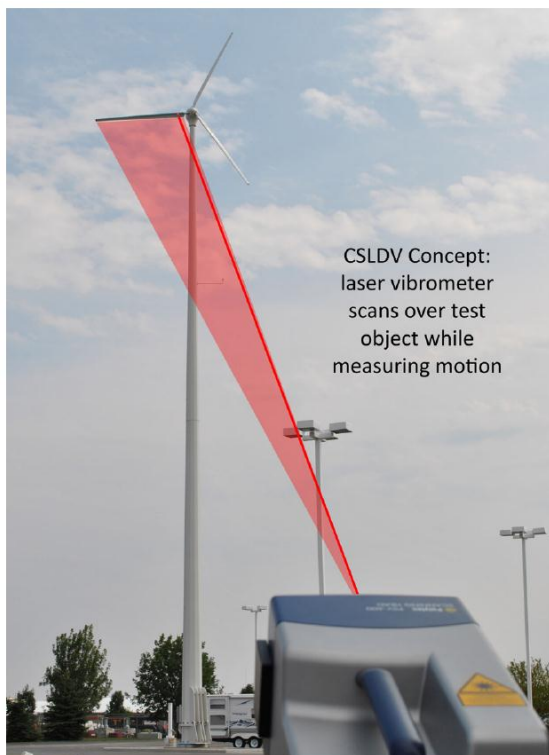


Kuva 2.15 Anturin johdon kiinnitys (Kainulainen 1997)

Lasermittauksessa mitattavan kappaleen pintaan kohdistetaan lasersäde, joka pinnasta heijastuu takaisin mittalaitteeseen. Näin pystytään mittaamaan kappaleen pinnan liikettä ja kiihtyvyyttä koskettamatta itse pintaa. Säde voi olla piste-mäinen, jolloin saadaan yksi mittauspiste tai useamman pisteen mitta-alue tai pyyhkäisy. Koskemattomuus onkin lasermittauksen suurin etu. Kiihtyvyyssantureita käytettäessä niiden massalla ja kiinnityksellä on vaikutusta mittaustulok-

siin, mutta lasermittauksella kappale pystymään mittaamaan luonnollisessa tilassaan. Tämä on hyödyllistä erityisesti pieniä ja kevyitä kappaleita mitattaessa, joissa kiihtyvyyssantureiden vaikutus on suuri. Lisäksi lasermittaus voidaan suorittaa pitkänkin matkan päästä kohteesta.

Kuvassa 2.16 suoritetaan käynninaikainen moodianalyysi tuuliturbiinin siivelle. Turbiini ei pyöri mittauksen aikana vaan herätteenä toimii mittausta paikalla vallitseva tuuli. Vasteen mittauksessa käytetään lasermittausta, jossa mittalaite on asetettu maahan kauaksi turbiinista.



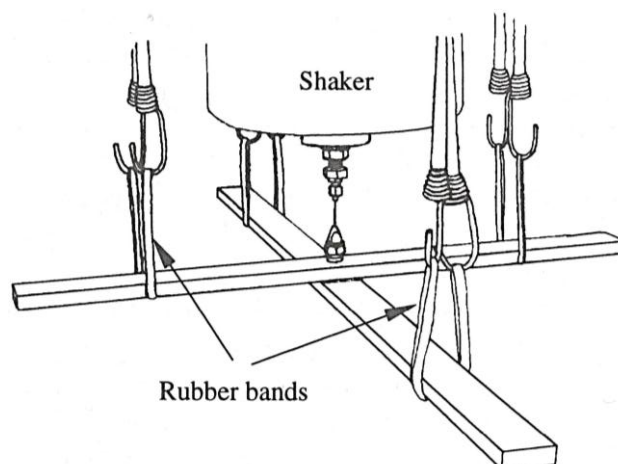
Kuva 2.16 Tuuliturbiinin lasermittaus (Yang & Allen 2011)

Lisäksi lasermittauksella voidaan saada pieneltäkin alueelta tuhansia mittauspisteitä, mikä kiihtyvyyssantureita käytettäessä olisi mahdotonta. Lasermittaus on myös helposti automatisoitavissa liikkuvien peilien tai robotin avulla. Lasermittauksen haittoja ovat mittalaitteiden kalleus, mittalaitteiden huolellinen säätäminen ennen mittausta sekä se, että mittavan kappaleeseen tulee olla näköyhteys. (Yang & Allen 2011; Garcia 2005.)

Muita liikettä mittaavia antureita ovat muun muassa suhteellisen siirtymän anturi, venymäliuskoihin perustuva kiihtyvyyssanturi ja nopeusanturi (Kainulainen 1997).

2.2.5 Kappaleen kiinnitys analyysissä

Kokeellisessa moodianalyysissä (Experimental Modal Analysis, EMA) mitattavan kappaleen kiinnitys voi olla vapaa (free) tai tuettu (grounded). Vapaa tuenta tarkoittaa, että kappale on vapaana ilmassa ja pääsee liikkumaan rajoituksetta. Tällöin analyysissä esiintyy kaikki kuusi jäykän kappaleen muotoa, joiden ominaistajuudet ovat nolla hertziä. Käytännössä täysin vapaata tuentaa on mahdoton toteuttaa. Yleisimmin kappaleet kiinnitetään keveiden ja elastisten naru-
jen varaan roikkumaan. Kappale voidaan myös asettaa hyvin joustavien jousien tai pehmeän tyynyn päälle. Tuennan vaikutuksen takia jäykän kappaleen ominaistajuudet poikkeavat nolasta, joten analyysissä tulee varmistua, että korkeimman jäykän kappaleen ominaistajuus on 10–20 % alhaisimman taivutusmuodon ominaistajuudesta. Tällöin varmistutaan siitä, että kappaleen massa ja inertiaominaisuudet voidaan vielä mitata. Analyysiä varten kappaleen kiinnitys tulee tehdä ominaisvärähtelymuotojen solmupisteistä, jolloin tuennan vaikutus on pienimmillään. Kuvassa 2.17 on vapaa kiinnitysmenetelmä toteutettu kumiköysien sekä kuminauhojen avulla. (Ewins 1991, s.90-92.)



Kuva 2.17 Vapaa-tuenta käyttäen joustavia kuminauhoja (Maia & Silva 1997)

Toinen kiinnitystapa on tuettu kiinnitys. Yleensä tuetussa kiinnityksessä kappale tuetaan sen toiminnallisista kiinnityspisteistään lattiaan. Kun käytetään jäykkää tuentaa, tulee tuennan jäykkyys maksimoida. Turvallisin tapa on kiinnittää kappale alustalle, jonka ominaistaajuusalue on paljon suurempi kuin mittauksessa käytettävä ominaistaajuusalue. Jäykässä tuennassa on enemmän virhe- ja häiriötekijöitä kuin vapaassa tuennassa, joten jäykkää tuentaa käytettäessä tuetaan ja sen vaikutus analyysiin tulee huomioida. Isoja ja painavia kappaleita mitattaessa voidaan käyttää myös jousitettua kiinnitysalustaa, jonka jousto-ominaisuudet eri suuntiin tunnetaan, jolloin niiden vaikutus voidaan eliminoida analyysissä. (Ewins 1991, s.90-92.)

2.2.6 Laitteiston kalibrointi

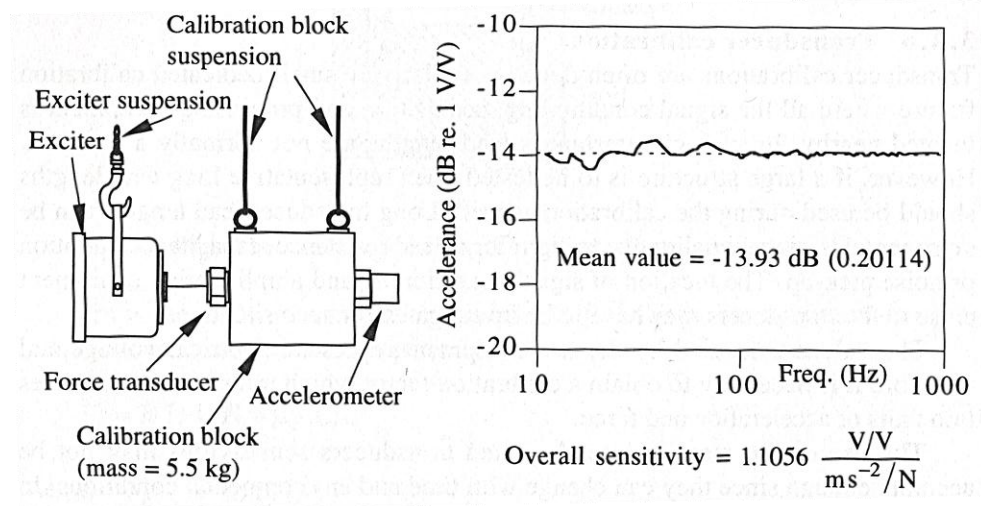
Useimmat kiihtyvyyssanturit kalibroidaan ja testataan valmistajalla, mutta niiden testaus ennen mittausta on tärkeää monista syistä. Ensimmäiseksi varmistetaan, että kytkennät ja liitokset ovat kunnossa eikä niistä aiheudu tarpeetonta häiriötä mittaukseen. Toiseksi voidaan varmistua siitä, että vahvistus-, napaisuus- ja vaimennusasetukset ovat oikein säädetty. Kolmanneksi voidaan varmistua siitä, että anturit pystyvät toimimaan halutulla taajuusalueella. (Døssing 1988.)

Helpoin ja eniten käytetty kalibrointimenetelmä on mitata yksinkertaisen kappaleen siirtyvyys. Kalibrointitesti suoritetaan jollekin yksinkertaiselle kappaleelle, jonka massa voidaan tarkasti punnita. Kappaleen massa voidaan myös lisätä antureiden massat. Kappale ripustetaan joustavasti vapaaksi ja kappaleeseen isketään herätevasaralla tai tärstimellä voimapulssi. Saatu vaste lasketaan yhtälön 2.7 mukaisesti.

$$A(\omega) = \frac{\ddot{x}(t)}{f(t)} = \frac{1}{m} \quad (2.7)$$

missä $\ddot{x}(t)$ on mitattu kiihtyvyys, $f(t)$ on mitattu voima sekä m testikappaleen massa. Tällöin kaikilla taajuuksilla vasteen amplitudi eli suuruus tulee olla kappaleen massan käänteisluku ja vaihe nolla astetta. Vaste voidaan esittää

taajuuden funktiona, tällöin hyvin kalibroidulla systeemillä funktion tulisi olla vaakasuora. Kuvassa 2.18 on esitetty kalibrointimittausjärjestely ja kalibrointimittaus esimerkki. (Maia & Silva 1997, s.145-146.)



Kuva 2.18 Kalibroinnin testijärjestely ja koemittaus (Maia & Silva 1997)

Mittaussysteemin kokonaisherkyys (overall sensitivity) saadaan jakamalla mitattu vaste laskemalla saadulla vasteella. Tällöin mitaussysteemin kokonaisherkyys saadaan yksikössä $\frac{\text{V/V}}{\text{ms}^{-2}/\text{N}}$. (Maia & Silva 1997, s.145-146.)

2.2.7 Käynninaikainen moodianalyysi

Käynninaikaisessa moodianalyysissä (Operational Modal Analysis, OMA) mitataan vain rakenteesta ulostulevaa signaalia. Tämän vuoksi käynninaikaista moodianalyysiä nimitetään usein output-only-moodianalyysiksi. Herätteenä rakenteelle toimivat ympäröivät ja luonnolliset käynninaikaiset voimat, joita ei siis mitata. Luonnollisia herätteitä ovat esimerkiksi tuuli, aallot ja laakeritärinä. Käynninaikaista moodianalyysiä käytetään kokeellisen moodianalyysin sijasta silloin, kun halutaan analysoida tarkkoja ominaismuotoja käyttöolosuhteissa sekä tapauksissa, joissa kappaleen kiinnittäminen tai täristäminen on vaikeaa tai mahdotonta. Käynninaikaista moodianalyysiä on käytetty eniten rakennusten ja siltojen analysointiin, mutta nykyisin sitä käytetään myös mekaanisissa raken-

teissa, kuten lentokoneiden, laivojen ja erilaisten kulkuneuvojen analysointiin. Käynninaikainen moodianalyysi voidaan suorittaa samoilla mittausvälineillä kuin kokeellinen moodianalyysikin hankkimalla käynninaikaisen moodianalyysin sisältämä mittausohjelmisto. (Brüel and Kjær Sound & Vibration Measurements 2009.)

3 YRITYKSEN TARVITSEMAT MITTALAITEHANKINNAT

3.1 Tarvittavat mittalaitteet

Opinnäytetyön yhtenä osa-alueena oli selvittää ne yrityksen tarvitsemat mittalaitteet, joilla voidaan suorittaa kokeellinen moodianalyysi The Switchin Lappeenrannan tehtaalla kokoonpantaville laitteille. Suurimman Lappeenrannan tehtaalla kokoonpantavan generaattorin massa on suuruusluokaltaan 20 tonnia ja halkaisijaltaan kaksi metriä.

The Switchillä on käytössä Brüel & Kjaer Pulse 3560B -analysaattori ja neljä kappaletta Brüel & Kjaer Deltatron 4508B -kiihtyvyyssantureita, joilla laakeritärinää mitataan generaattoreista. Kyseinen mittauslaitteisto soveltuu hyvin myös kokeellisen moodianalyysiin käyttöön. Moodianalyysia varten on hankittava moodianalyysin sisältävä analysointiohjelmisto sekä käyttökohteeseen soveltuva herätelähde.

Brüel & Kjær on johtava ääni- ja värinämittauslaitevalmistaja maailmassa. Sen Pulse -tuoteperhe koostuu eri laitteistoista ja ohjelmistoista, jotka mahdollistavat lukuisia eri analyysieja eri käyttökohteisiin. Brüel & Kjær Pulse 3560B on kannettava PC-pohjainen ääni- ja värinäanalysaattori, joka käsittelee eri mittalaitteilta tulevan datan PC:llä olevalle ohjelmistolle sopivaan digitaaliseen muotoon. PC:llä mittauksista saatavaa tietoa käsitellään ja prosessoidaan haluttuun muotoon eri ohjelmistojen avulla. Brüel & Kjær Pulse 3560B -analysaattori on kuvassa 3.1.



Kuva 3.1 Brüel & Kjær Pulse 3560B analysaattori (Brüel & Kjær 2011)

Pulse 3560B -analyssaattorissa on viisi mittauskanavaa, joten laitteistoon pystytään liittämään moodianalyysiä varten herätelähteen lisäksi neljä kiihtyvyyssanturia värähtelymuotojen mittaamiseksi. Kokeellisen moodianalyysin lisäksi muita käyttökohteita analyssaattorille voivat olla muun muassa äänimittaukset, tasapainotus, tärinämittaukset ja käynnin aikainen moodianalyysi. (Brüel & Kjær 2011.)

3.2 Herätevasaran ja -tärhistimen vertailu

The Switchille tarvittavan herätelähteen valinta aloitettiin vertailemalla herätevasaran ja tärhistimen etuja sekä heikkouksia, joita on lueteltu alla. (Døssing 1988).

Herätevasaran edut:

- nopeus
- huolellinen kiinnitys ei välttämätöntä
- ei vaihtelevaa massarasitusta rakenteessa
- kannettava ja soveltuu hyvin kenttäolosuhteisiin
- suhteellisen edullinen.

Herätevasaran heikkoudet:

- ei sovellu kohteisiin, joissa on epälineaariset ominaisuudet
- korkea voimapiikki voi vaurioittaa rakennetta paikallisesti
- signaali on korkeasti deterministinen.

Täristimen edut:

- mahdollistaa rajattoman määrän erilaisia herätteitä
- herätteen voimakkuutta ja taajuutta voidaan muuttaa
- soveltuvat monenkokoisille kappaleille ja rakenteille
- mahdollistaa väsymisanalyysit.

Täristimen heikkoudet:

- vaatii lisälaitteita toimiakseen (vahvistin, voima-anturi)
- vaatii tarkemmat mittaussj järjestelyt
- kalliimpi ratkaisu.

3.3 Brüel & Kjærin herätevasarat

Brüel & Kjær valmistaa herätevasaroita neljässä eri kokoluokassa, jotka on lueteltu alla käyttökohteineen (Brüel & Kjær 2011).

- 8204 Miniature Impact Hammer, 22.7 mV/N (piirilevyt, turbiinien lavat)
- 8206 Impact Hammer, 22.7 mV/N (moottorilohkot, autojen rungot)
- 8207 Modal Sledge Hammer, 1 lb. (keskikokoiset rakenteet, isot auton rungot)
- 8208 Modal Sledge Hammer, 3 lb. (isot säiliöt, betoniperustukset).

Muita herätevasaran valmistajia ovat muun muassa Dytran, Omega ja PCB, joiden herätevasarat ovat hyvin samankaltaisia kuin Brüel & Kjærin herätevasarat.

Sopivin herätevasara The Switchin käyttötarkoitukseen Brüel & Kjærin valikoimasta olisi herätevasara 8206, koska sitä isommat mallit ovat hyvin järeitä ja pienempien kappaleiden mittaaminen niillä olisi vaikeaa. Brüel & Kjærin pienin vasaramalli 8204 on taas liian pieni The Switchin käyttötarkoitukseen. Keskikokoinen vasara 8206 sisältää kolme erilaista lyöntipäätä, viiden metrin pituisen

kaapelin ja lyöntipäähän lisäpainon. Vasara mahdollistaa 350 N herätevoiman ja 10–2000 Hz herätetaajuudet, jotka todettiin The Switchin käyttötarkoituksiin riittäviksi. Brüel & Kjær herätevasara 8206 on esitetty kuvassa 3.2. (Brüel & Kjær 2011.)



Kuva 3.2 Brüel & Kjær herätevasara 8206 (Brüel & Kjær 2011)

Mittauslaitteistossa Brüel & Kjaer Pulse 3560B olisi todennäköisesti mahdollista käyttää myös muiden valmistajien herätevasaroita, mutta hintaero Brüel & Kjærin ja muiden valmistajien vasaroiden välillä ei ole ratkaiseva. Käyttämällä Brüel & Kjaerin valmistamaa vasaraa varmistetaan myös vasaran yhteensopivuus sekä mittauksen luotettava toimiminen Brüel & Kjaerin mittausohjelman kanssa.

3.4 Brüel & Kjær hand-held exciter 5961

Toinen vaihtoehto herätevasaralle on esimerkiksi Brüel & Kjærin käsitäristin. Se on helpompi ja nopeakäyttöisempi kuin isommat täristimet, mutta mahdollistaa laajempien analyysien suorittamisen kuin herätevasara. Kuvassa 3.3 on Brüel & Kjær käsitäristin 5961.



Kuva 3.3 Brüel & Kjær käsitäristin 5961 (Brüel & Kjær 2011)

Käsitäristimen ominaisuuksia (Brüel & Kjær 2011):

- pienille ja keskikokoisille rakenteille
- elektromagneettinen täristin sisäänrakennetulla paristolla toimivalla vahvistimella
- yhdistää täristimen ja vasaran parhaat puolet
- nopea mittaus ja laajat taajuusalueet.

3.5 Mittalaitteiden valinta

Kun tarvittavat mittalaitteet oli saatu selville, tehtiin tarjouspyyntö The Switchin kautta Brüel & Kjaerin herätevasarasta 8206 ja käsitäristimestä 5961. Tarjoukset pyydettiin Brüel & Kjaerin maahantuojaalta Metric Industrial Oy:ltä. Tässä vaiheessa tehtävänanto oli myös tarkentunut siten, että analyysijä tultaisiin tekemään sekä generaattoreiden eri osille että koko generaattoreille. Mittalaitteiden selvityksessä pyydettiin myös huomioimaan mahdollisuus suurten suorave-toisten generaattoreiden moodianalyysiin. The Switchin valmistamat suorave-toiset generaattorit ovat halkaisijaltaan kuusi metrisiä ja massaltaan noin 100 tn.

Eri mittalaittevalmistajien osalta todettiin, että yhteensopivuus ja luotettavuus ovat tärkeitä valintakriteerejä mittalaittehankinnoille. Näin ollen on järkevää käyttää jo olemassa olevan Brüel & Kjaer Pulse 3560B -analysaattorin kanssa Brüel & Kjaerin valmistamia herätevasaroita ja täristimiä. Herätevasaran 8206 hinta

on kalliimpi kuin useimpien muiden valmistajien vastaavat herätevasarat, mutta Brüel & Kjaer on tunnettu hyvästä laadustaan ja on maailman johtava valmistaja alallaan.

The Switchin mittaustarpeisiin mielestäni paras ratkaisu olisi hankkia keskikokoinen herätevasara 8206 ja iso tärstin. Yhdellä laitteella tuskin pystytään suorittamaan luotettavaa moodianalyysia tarvittaville kappaleille, koska niiden koko ja massa vaihtelevat suuresti. Herätevasaralla pystytään tekemään nopeita ja yksinkertaisia analyysejä pienille ja keskikokoisille kappaleille, kun taas isolla tärstimellä voidaan suorittaa tarkempia ja monimutkaisempia analyysejä keskikokoisille ja suurille kappaleille. Suurten suoravetoisten generaattoreiden moodianalyysiin Brüel & Kjaer suosittelee suuresti käynninaikaisen moodianalyysin käyttöä.

Mittalaitteiden valinnassa The Switch päätyi tilaamaan aluksi keskikokoisen vasaran 8206. Tarkoituksena heillä on oppia tekemään ensin yksinkertaisempia moodianalyysiejä herätevasaran kanssa ja kokemuksen karttuessa voidaan siirtyä monimutkaisempiin analyyseihin.

4 CASE: PMR 450B LAAKERIKILVEN JA RUNGON VÄLISEN LIITOKSEN JÄYKKYYDEN SELVITTÄMINEN

Opinnäytetyön case-osuutena oli The Switchin standardinopeuksisen PMR 450B -kestomagneettigeneraattorin rungon ja laakerikilven välisen liitoksen jäykkyyden selvittäminen. PMR 450B -generaattorissa laakerikilpi on valurautainen ja runko teräsosista hitsaamalla koottu rakenne. Kyseiseen case-osaan liittyy myös Eero Schermanin opinnäytetyö (Scherman, 2011), jossa liitoksen jäykkyyttä tutkitaan FEM-analyysin avulla. Pyrkimyksenä on kokeellisen moodianalyysin avulla saada tietoa liitoksen jäykkyyssominaisuuksista ja näillä tiedoilla voidaan FEM-mallia verifioida vastaamaan todellista rakennetta. Oma osuuteni oli suorittaa kokeellinen moodianalyysi kyseiselle rakenteelle yhdessä Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT) tutkijan Janne Heikkisen kanssa.

Moodianalyysi suoritettiin The Switchin Lappeenrannan tehtaalla ja mittauslaitteistona käytettiin teknillisen yliopiston moodianalyysilaitteistoa. The Switchin mittauslaitteistoa ei pystytty käyttämään case-mittauksessa, koska siihen tarvittavan analyysiohjelmiston toimitus viivästyi.

LUT:n moodianalyysilaitteistossa analysaattorina on Brüel & Kjaer 2825 sekä jokaiselle mittauskanavalle oma vahvistinlaatikko. Sekä LUT:n että The Switchin analysaattorit totesin hyvin samankaltaisiksi. Vaikka laitteet ovat eri vuosikymmeniltä, olivat sekä liitännät että valitsimet pysyneet melkein muuttumattomina. Suurin ero laitteistojen välillä oli, että LUT:n laitteiston ulkoiset vahvistimet olivat The Switchin analysaattorissa sisäänrakennetut ja analysaattorin fyysinen koko oli pienentynyt. LUT:n laitteistossa antureiden vahvistus- ja herkkyysasetukset asetetaan eri valitsimilla ulkoisessa vahvistimessa, mutta uudemmassa The Switchin laitteessa antureiden asetukset säädetään mittausohjelmistossa. Lisäksi moodianalyysiohjelmistot ovat kehittyneet ja tulleet entistä helppokäyttöisemmiksi. Nykyisissä analysointiohjelmistoissa mittausjärjestelyt, itse mittaus tapahtuma sekä tulosten jälkikäsitteily suoritetaan samalla ohjelmalla, mikä ennen ei ollut mahdollista. Kuvassa 3.4 on LUT:n mittauslaitteisto.



Kuva 3.4 LUT:n moodianalyysin mittauslaitteisto

Ennen varsinaista mittausta suoritimme koemittaukset LUT:n laboratoriossa yhdessä Janne Heikkisen ja LUT:n laboratoriohenkilökunnan kanssa. Koemittaus suoritettiin terästangolle, jonka ominaistuuksia laskin FEM-analyysin avulla SolidWorks Simulation -ohjelmistolla. Koemittauksen tarkoituksena oli tutustua LUT:n moodianalyysilaitteistoon ja sen käyttöön ennen varsinaista mittauspäivää. Laitteiston asetukset asetettiin valmiiksi, jotta varsinaisissa mittauksissa päästään heti alkuun, eikä aikaa kulu laitteiston mittausvalmiuteen laittamisessa.

4.1 Mittausten suorittaminen

Ensimmäiseksi mittasimme laakerikilven vapaat ominaistuuksia. Laakerikilpi ripustettiin kumikyöden varaan joustavasti roikkumaan torninosturilla. Vapaista ominaistuuksista teimme neljä eri mittausta, antureiden kiinnityspaikkaa vaihdellen. Herätevasarassa käytimme muovikärkeä, jonka taajuusalue on 0–2000 Hz ja herätevoima 300–1000 N. Antureina käytimme mittauksessa Brüel & Kjaerin magneettikiinnitteisiä kiihtyvyyssantureita, joita oli kolme kappaletta. Antureiden kiinnityspaikkoina käytimme ulkopuolella olevaa kevennystä, ulkokehän koneistettua pintaa sekä laakerikilven sisäkehää. Vasaran iskupaikkana käytimme laakerikilvessä olevaa kevennystä sekä kilven alareunaa. Erillisessä liitteessä 1 on kuvattu käytetyt antureiden sekä iskupaikkojen sijainnit laakerikilvessä. Jokaisessa mittauksessa käytimme neljän iskun keskiarvoa, jotta mahdolliset häiriöt ja virhelyönnit suodattaisivat pois mittauksista.

Erillisessä liitteessä 2 on kuvattu, kuinka laakerikilpi on kiinnitetty joustavasti kumikyöydellä sekä anturit kiinnitetty laakerikilven kevennysten kohdalle. Iskupaikkana käytetään laakerikilven kevennystä. Tämän jälkeen laakerikilpi kiinnitettiin rungon D-päähän eli vetopäähän oikealla momentilla. Rungon ja kilven mittauksissa käytimme samaa mittauksen variointitapaa kuin vapaan kilven mittauksissa eli anturit olivat vuorotellen kiinni kevennysten, ulkokehän sekä sisäkehän kohdalla. Iskupaikkoina käytimme kilven kevennystä, kilven alareunaa ja iskua runkoon kilven viereen. Generaattorin rungon kiinnityksenä käytimme neljää eri tapaa. Ensimmäisissä mittauksissa runko oli kuormalavan päällä sidottuna kahdella metallipannalla. Toisessa mittauksisarjassa runko nostettiin keski-

kohdastaan nostoraksin varaan ilmaan roikkumaan. Kolmas mittaussarja suoritettiin rungon ollessa betonilattialla sekä viimeisessä mittaussarjassa runko oli lattialla kumilevyn päällä. Erillisessä liitteessä 3 on kuvattu, kuinka laakerikilpi on kiinnitetty generaattorin runkoon ja asetettu maahan kumilevy päälle.

Yleisesti ottaen mittaukset sujuivat ripeästi ja ongelmitta. Mittauksia suoritettiin päivän aikana yhteensä 31 kappaletta. Mittauksia olisi voitu varioida vielä kokeilemalla antureille eri herkkyysasetuksia sekä tarkentamalla mittausohjelmistossa mittausväliä. Lisämittausten suorittamista ei kuitenkaan koettu tarpeelliseksi, koska saadut tulokset olivat johdonmukaisia ja aika oli rajallinen opinnäytetyön puitteissa. Mittausten jälkeen Janne Heikkinen purki saadut mittaustulokset analysointiohjelmistosta ja muunsi ne MatLab-ohjelmalle sopivaan muotoon. MatLab-ohjelmistolla taajuusvastefunktioita voitiin analysoida tarkemmin. MatLab on MathWorks-yhtiön ylläpitämä numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmisto, jolla voidaan suorittaa matemaattista laskentaa sekä esittää funktioiden kuvaajia. (MathWorks 2011.)

4.2 Tulosten tulkinta

Tuloksia tulkittiin kolmella eri lähestymistavalla. Ensimmäiseksi selvitettiin, miten generaattorin eri tuentatavat vaikuttavat mittauksiin sekä mikä tuentatapa olisi parhain kyseisen kaltaiseen mittaukseen. Saaduista mittaustuloksista laadin taajuusvastefunktion kuvaajan, jossa taajuusvastefunktiot on esitetty eri kiinnitysmenetelmillä. Erillisessä liitteessä 4 on taajuusvastefunktiot neljällä eri generaattorin kiinnitysmenetelmällä. Tuloksista voidaan päätellä, että eri kiinnitysmenetelmillä ei ollut suurta vaikutusta taajuusvastefunktioon. Selkeimmät funktiot saatiin kuormalava- sekä vapaakiinnityksessä. Rungon ollessa maassa sekä kumien varassa taajuusvastefunktiossa näkyi nollan Hertzin kohdalla iso häiriöpiikki.

Toisessa tapauksessa laadin kuvaajan, jossa on vertailtu eri iskupaikkojen vaikutusta taajuusvastefunktioihin. Kuvaaja on esitetty erillisessä liitteessä 5. Antureiden kiinnityskohtana kuvaajissa on laakerikilven kevennys. Iskupaikkoina olivat laakerikilven sisäkehä, kilven kevennys, kilven ulkokehä sekä generaatto-

rin runko. Tuloksista voidaan päätellä, että parhaimmat iskukohdat olivat laakerikilven sisäkehä sekä kevennyksen kohta. Ulkokehälle iskettäessä taajuusvastefunktion piikit ovat selvästi matalampia ja vaikeammin erotettavissa. Generaattorin runkoon iskettäessä heräsi paljon rungon taajuuksia, mutta halutut laakerikilven taajuudet jäivät kunnolla heräämättä ja niitä on vaikea erottaa muista piikeistä.

Kolmannessa tapauksessa on vertailtu eri mittauspisteiden vaikutusta taajuusvastefunktioon. Kuvaaja on esitetty erillisessä liitteessä 6. Kyseisessä mittauksessa isku tuotiin kilven kevennykseen ja antureiden kiinnityspaikkoina käytettiin kilven sisäkehää, kilven kevennystä sekä ulkokehää. Parhaimmat mittauspaikat olivat kevennyksen kohta sekä sisäkehä. Ulkokehältä mitattaessa funktion piikit olivat selvästi matalampia ja vaikeammin erottuvia, kuten iskukohtia vertaillessamme huomasimme.

Tuloksista voidaan päätellä, että moodianalyysin teoria ja mittausohjeet pitivät hyvin paikkansa. Parhaimmat tulokset saatiin, kun sekä mittaus että isku tapahtuivat paikkaan, jossa värähtelymuodoissa esiintyy eniten liikettä. Lisäksi tuloksista voidaan todeta, että mittauksessa ei ole väliä, siirretäänkö iskupistettä vai mittauskohtaa. Laakerikilvestä mitatut ominaistaajuuudet vapaana sekä kiinnitettynä on esitetty suhteutettuna taulukossa 4.1, täsmälliset mittausarvot ominaistaajuuksista on esitetty erillisessä liitteessä 7. Laakerikilven vapaa-tuennassa mitattu taajuusvastefunktio on esitetty erillisessä liitteessä 8.

Taulukko 4.1 Suhteutetut ominaistaajuuudet laakerikilvelle

	1.taajuus	2.tajuus	3.taajuus	4.taajuus	5.taajuus
Kilven vapaat muodot	1	1	1	1	1
Kilpi kiinnitettynä	0,490	0,639	0,839	0,808	1,022

Saatujen mittaustuloksien perusteella Eero Scherman verifioi rungon ja laakerikilven simulointimallia vastaamaan mittaustuloksia. Eniten todellista rakennetta vastaa simulointimalli, jossa laakerikilven ja rungon välissä on virtuaalinen jousi, jonka jousivakio on 15000 kN/mm luokkaa. Simuloinnissa myös kiinnitysmene-

telmä, jossa laakerikilpi kiinnitetään kiinnityspulttien reikien sylinteripinnoista, antoi kohtuullisella tarkkuudella olevia tuloksia. (Scherman 2011.)

5 PÄÄTELMÄT

Opinnäytetyö antoi loistavan tilaisuuden tutustua tarkemmin mekaanisiin värähtelyihin liittyvään teoriaan, värähtelymittalaitteiden valintaan sekä käytännön moodianalyysin suorittamiseen. Kokeellisen moodianalyysin suorittamiseen tarvitaan vähintään kahdella yhtäaikaaisella mittauskanavalla oleva analysaattori, herätelähde, vasteen mittaaja sekä analysointiohjelmisto. Tärinäanalysaattorit ovat suhteellisen kalliita, mutta samaa analysaattoria voidaan yleensä käyttää moniin eri käyttökohteisiin. Kokeellisen moodianalyysin käyttökohteita ovat muun muassa rakenteen ominaisvärähtelyjen ja -muotojen selvittäminen, laskentatulosten todentaminen sekä simulointimallien verifiointi.

Yleisin käytetty herätelähde moodianalyysissä on herätevasara tai täristin. Herätevasaraa tai täristintä valittaessa tulee valinta suorittaa käyttökohteiden mukaan. Yleisesti herätevasarat soveltuvat nopeisiin ja yksinkertaisiin analyyseihin pienille ja keskikokoisille rakenteille. Täristimillä taas voidaan suorittaa monimutkaisempia analyysejä suurillekin rakenteille. Vasteen mittauksessa käytetyin menetelmä on pienikokoinen kiihtyvyysanturi.

Mittalaitteiden valinnassa tärkeintä on selvittää, minkä tyyppisiä ja kokoisia rakenteita mitataan. Moodianalyysilaitteistoa valittaessa on hyvä aloittaa yksinkertaisesta ja kokemuksen lisääntyessä siirtyä askel kerrallaan monimutkaisempiin analyyseihin ja laitteistoihin.

Case-mittauksessa saatujen tulosten ja kokemusten pohjalta voidaan todeta, että rakenteen tuentatapa tai antureiden sijainti eivät vaikuta ominaistuuksien arvoihin vaan taajuusvastefunktion selkeyteen. Parhaimmat tulokset saadaan, kun vasteen mittausanturit sekä herätelähde ovat paikoissa, joissa liikettä tulee olemaan eniten rakenteessa. Kyseisessä case-mittauksessa generaattorin tu-

ennalla ei todettu olevan merkittävää vaikutusta taajuusvastefunktioon, mutta generaattorin kuormalava- sekä vapaakiinnitykset antoivat selkeimmät taajuusvastefunktiot. Mittauksissa huomattiin myös, että monen heräteiskun keskiarvon käyttö analyysissä suodattaa suurimman osan mittauksissa esiintyvistä häiriöistä ja virhelyönneistä.

KUVAT

Kuva 1.1 Vaaka-akselisen tuuliturbiinin pääkomponentit (Brüel and Kjær Sound & Vibration Measurements), s. 6

Kuva 1.2 The Switchin tuotantolinjamalli (The Switch 2011), s. 7

Kuva 1.3 The Switchin nopeakäyntinen kestomagneettigeneraattori (The Switch 2011), s. 8

Kuva 2.1 Yhden vapausasteen värähtelijä (Pennala 1999, s.13), s. 10

Kuva 2.2 Jäykän kappaleen kuusi eri vapausastetta (Inman 2008), s. 10

Kuva 2.3 Kahden vapausasteen systeemi (Sopanen 2010), s. 12

Kuva 2.4 Eri vaimennussuhdetapaukset (Sopanen 2010), s. 13

Kuva 2.5 FFT-muunnoksen periaate (Valkonen 2008), s. 14

Kuva 2.6 Erään mittauksen taajuusvastefunktio (Ewins 1991), s. 15

Kuva 2.7 Esimerkki puolitehopisteiden määrittämisestä (Sopanen 2010), s. 15

Kuva 2.8 Vaimennussuhteen vaikutus taajuusvastefunktion. (Maia & Silva 1997), s. 16

Kuva 2.9 Kokeellisen moodianalyysin mittauslaitteisto (Døssing 1988), s. 18

Kuva 2.10 Herätevasaran pääkomponentit (Ewins 1991), s. 20

Kuva 2.11 Brüel & Kjær 8206 herätevasaran eri lyöntipäiden vaikutus (Brüel & Kjær 2011), s. 20

Kuva 2.12 Brüel & Kjær elektromagneettinen tärustin (Brüel & Kjær 2011), s. 22

Kuva 2.13 a) Täristimen ihanteellinen kiinnitys (Ewins 1991), s. 23

Kuva 2.13 b) Toinen menetelmä täristimen kiinnitykseen (Ewins 1991), s. 23

Kuva 2.14 Brüel & Kjær 8344 DeltaShear kiihtyvyyssanturi (Brüel & Kjær 2011), s. 23

Kuva 2.15 Anturin johdon kiinnitys (Kainulainen 1997), s. 24

Kuva 2.16 Tuuliturbiinin lasermittaus (Yang & Allen 2011), s. 25

Kuva 2.17 Vapaa-tuenta käyttäen joustavia kuminauhoja (Maia & Silva 1997), s. 26

Kuva 2.18 Kalibroinnin testijärjestely ja koemittaus (Maia & Silva 1997), s. 28

Kuva 3.1 Brüel & Kjær Pulse 3560B analysaattori (Brüel & Kjær 2011), s. 30

Kuva 3.2 Brüel & Kjær herätevasara 8206 (Brüel & Kjær 2011), s. 32

Kuva 3.3 Brüel & Kjær käsitärstin 5961 (Brüel & Kjær 2011), s. 33

Kuva 3.4 LUT:n moodianalyysin mittauslaitteisto, s. 35

TAULUKOT

Taulukko 4.1 Suhteutetut ominaistajuudet laakerikilvelle, s. 38

LÄHTEET

Agilent Technologies. 2000. The Fundamentals of Modal Testing, Application Note 243-3. USA: Agilent Technologies.
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5954-7957E.pdf> (Luettu 1.4.2011)

Brüel & Kjær. <http://www.bksv.com> (Luettu 14.3.2011)

Brüel and Kjær Sound & Vibration Measurements. 2009. Operational Modal Analysis on a Wind Turbine Gearbox. www.bksv.com/doc/bn0558.pdf (Luettu 28.3.2011)

Døssing, O. 1988. Structural testing Part1: Mechanical Mobility Measurements. <http://www.bksv.com/doc/br0458.pdf> (Luettu 14.3.2011)

Ewins, D. 1991. Modal testing: Theory and Practice. Viides painos. Great Yarmouth Iso-Britannia: Galliard Ltd.

Garcia, J. 2005. Test Planning, a LASER Based Vibration Measurement a LASER Based Vibration Measurement.
<http://www.vivaceproject.com/content/forum1/4-10.pdf> (Luettu 14.4.2011)

He, J. & Fu, Z-F. 2001. Modal Analysis. Ensimmäinen painos. Oxford Iso-Britannia: Butterworth-Heinemann.

Heikkinen, J. 2010. Kokeellisen moodianalyysin jälkikäsitteily ominaismuotojen visuaaliseksi tarkastelemiseksi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Inman, D. 2008. Engineering vibration. Kolmas painos. New Jersey USA: Pearson Education.

Kainulainen, J. 1987. Kokeellinen Moodianalyysi –luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Lähteenmäki, M. 2007. Värähtelymekaniikka, luku 6.
http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/vmek_pdf/luku_6.pdf (Luettu 20.4.2011)

Maia, N & Silva, J. 1997. Theoretical and Experimental Modal Analysis. Ensimmäinen painos. Iso-Britannia: SRP Ltd.

MathWorks. <http://www.mathworks.com/products/matlab/> (Luettu 27.4.2011)

Pennala, E. 1999. Koneiden ja rakenteiden värähtelyt. Helsinki: Otatieto.

Scherman, E. 2011. Koneteknisen laskennan menetelmät ja ohjeistus standardinopeustuulivoimalageneraattorin analysointiin. Saimaan ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, kone- ja tuotesuunnittelu. Insinööri-työ.

Schwarz, J & Richardson, H. 1999. Experimental Modal Analysis. Vibrant Technology, Inc. Jamestown, California.

Sopanen, J. 2010. Värähtelymekaniikan luentomateriaali. Saimaan ammattikorkeakoulu.

Suomen tuulivoimayhdistys ry. <http://www.tuulivoimayhdistys.fi> (Luettu 27.3.2011)

The Switch. <http://www.theswitch.com> (Luettu 27.3.2011)

Valkonen, H. 2008. Jätevesipumpun jalustan värähtelytutkimus. Helsingin ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka, tuotesuunnittelu. Insinöörityö.

Yang, S & Allen, M. 2011. Output-Only Modal Analysis Using Continuous-Scan Laser Doppler Vibrometry and Application to a 20kW Wind Turbine. http://silver.neep.wisc.edu/~msallen/Yang-Allen_OMA-CSLDV_IMAC2011.pdf (Luettu 14.4.2011)